干旱区地理
ARID LAND GEOGRAPHY

doi:10.12118/j.issn.1000－6060.2020.01.15

基于模糊综合评价模型的中亚水资源开发潜力评估①

王旋旋[1,2]， 陈亚宁[1]， 李 稚[1]， 方功焕[1]， 王 非[1,2]， 张姣优[1,2]

（1 中国科学院新疆生态与地理研究所/荒漠与绿洲生态国家重点实验室，新疆 乌鲁木齐 830011；
2 中国科学院大学，北京 100049）

摘 要： 定量评估水资源开发潜力对掌握区域水资源开发现状、提高水资源利用率具有重要意义。通过选取水资源利用率、灌溉率、地表水控制率、人均占有水量、重复利用率、生活用水定额、供水量模数、生态环境用水率等 8 个重要指标，借助模糊综合评价模型对中亚五国水资源开发潜力进行定量分析。结果表明：中亚地区整体水资源开发利用处于中级阶段，开发潜力综合评分值为 0.502 7，表明开发潜力较大。其中，哈萨克斯坦水资源综合评分值最高，为 0.712 4，有很大的开发潜力，但要注意摒弃不合理的水资源利用方式；吉尔吉斯斯坦和塔吉克斯坦综合评分值分别为 0.591 1、0.488 7，有较大的开发潜力，但应注意由广度开发逐渐向深度开发转变。下游国家土库曼斯坦和乌兹别克斯坦处于开发利用的高级阶段，综合评分值分别为 0.352 6、0.315 0，水资源开发潜力较小。今后应注意发展节水型经济，注重水资源综合管理。

关 键 词： 水资源开发潜力；模糊综合评价模型；中亚五国

中亚地处欧亚大陆中心地带，远离海洋，气候干旱，拥有巨大且极为脆弱的荒漠生态系统，对气候变化及人类活动的响应十分敏感，该地区的水资源与生态环境问题一直是中亚各国乃至全世界关注研讨的热点问题[1]。一方面，近百年来，中亚地区持续升温，增温速率达 0.36～0.42 ℃·(10 a)$^{-1}$，显著高于全球平均增温速率〔0.175 ℃·(10 a)$^{-1}$〕[1-2]。中亚地区的水资源主要形成于天山山脉及周边中高山区，河流以冰川积雪融水补给为主，对全球气候变暖的响应尤为敏感。气候变暖影响中亚水循环过程，加快冰川积雪消融速度，导致山区水储量减少，并改变径流组分与水资源构成，这无疑加剧了中亚五国之间的用水矛盾[3]。另一方面，人口大量增长与土地的大规模开垦加剧了对水资源的竞争，引发了一系列生态环境问题，水资源矛盾也愈演愈烈。因此，研究全球变化背景下的中亚水资源问题，对加强中亚五国的交流合作，实现水资源可持续利用有重要意义。

自苏联解体以来，国内外众多学者开始关注中亚地区水问题，并开展了大量研究工作。有学者从跨界河流、径流量、水土资源开发、生态与水危机的角度分析了中亚水资源开发利用现状[1,4]，总结了开发利用过程中出现的问题，探讨了未来水资源合理利用的对策，认为面向未来、控制人口增长、改善经济结构、发展节水农业是解决中亚水问题的根本之道。还有学者采用基于数列的匹配度计算方法[5]，分析了不同年代中亚各国水资源利用与社会经济发展的匹配关系，发现二者在空间上的匹配度高于时间上的匹配度，并基于生态安全评估 PSR 模型，选取了 8 个水资源状态指标与 5 个土地资源状态指标，对 1988—2007 年中亚五国水土资源安全状态指标进行对比分析，得到了水资源与土地资源安全指标的时空变化特征[6]。CHEN 等[7]分析计算中亚天山地区的水资源变化，发现在过去 10 余年间，中亚天山地区的水资源以每年 22.3×10^8 m^3 的速度减少；同时，基于CMIP5气候情景和21个GCMs

① 收稿日期：2019－03－14； 修订日期：2019－08－28
基金项目：中国科学院战略性先导科技专项（A 类）资助（XDA19030204）
作者简介：王旋旋（1995－），女，硕士研究生，主要从事中亚水资源开发潜力评估方面的研究. E-mail：wangxuanxuan17@mails.ucas.edu.cn
通讯作者：陈亚宁. E-mail：chenyn@ms.xjb.ac.cn

模式预测结果表明在未来的半个多世纪中天山山区的水资源储量将继续处于亏缺状态。DENG 等[8]基于 GRACE 重力卫星数据,分析了 2003—2013 年中亚陆地水储量的时空变化,并探究气候变化与人类活动对陆地水储量变化的影响;发现中亚陆地水储量整体呈减少趋势,其中中亚北部和天山山区陆地水储量减少主要由气候因素造成,而中亚西部和塔里木河流域北部陆地水储量减少是由人类活动驱动的。SCHLUTER 等[9]评估了阿姆河流域湿地生态系统的脆弱性,并测试了未来不同气候情景下环境流量的选择方案,认为应将环境流量纳入阿姆河流域管理体系中,可为区域提供更好的生态系统服务。上述研究虽从不同角度分析了中亚水问题,但多以宏观定性研究为主,包括中亚各国水资源开发利用的冲突与合作、水资源管理的挑战与机遇、跨界河流的管理等。部分学者使用了定量研究方法,但主要以气候变化对水循环的影响、流域水环境、水土资源匹配为研究主题[5],而对中亚区域水资源开发潜力缺乏定量化研究。本文基于 1997—2014 年中亚各国的水资源统计数据,采用适宜于干旱区水资源评估的模糊综合评价模型,选取相关评价指标,对中亚各国水资源开发潜力进行了评估。旨在了解和掌握中亚地区水资源开发利用程度,为国家"一带一路"建设提供基础数据。

1 研究区概况

中亚五国包括哈萨克斯坦(简称 KAZ)、吉尔吉斯斯坦(简称 KGZ)、塔吉克斯坦(简称 TJK)、土库曼斯坦(简称 TKM)和乌兹别克斯坦(简称 UZB),位于 46°29′~87°18′E,35°07′~55°26′N 之间,总面积为 400.17 × 10^4 km^2。东邻中国新疆,南接阿富汗、伊朗,北部与西北部被俄罗斯环绕,西与里海相邻[10]。中亚地势西南高,东北低,最高点位于塔吉克斯坦境内的帕米尔高原,海拔为 4 000 ~7 500 m,绿洲与沙漠广泛分布于中南部海拔 200 ~400 m 的平原上,其中沙漠面积占总面积的 1/4 以上。西部为图尔盖高原和图兰低地。气候为典型的温带大陆性气候,炎热干燥,降水稀少,光照充足,蒸发量极大。中亚河流众多,且以跨界内陆河流为主,区内共有大小河流上万条,其中流域面积 3 019 km^2 以上的近 10 条[10-11]。主要河流包括阿姆河、锡尔河、楚河、塔拉斯河、伊犁河、额尔齐斯河等。其中,阿姆河长 2 540 km,是中亚水量最大的河流,由阿富汗的喷赤河和塔吉克斯坦的瓦赫什河汇合而成,途经乌兹别克斯坦和土库曼斯坦,最终在乌兹别克斯坦境内注入咸海[12]。锡尔河长 3 019 km,是中亚最长的河流,发源于天山山脉,由吉尔吉斯斯坦的那伦河和卡拉河汇合而成,流经塔吉克斯坦、乌兹别克斯坦、哈萨克斯坦,注入咸海。中亚矿产资源极为丰富,储存着大量的煤炭、石油、天然气,其中哈萨克斯坦是世界十大产煤国之一,乌兹别克斯坦是世界十大天然气开采国之一[11]。

2014 年,中亚地区总人口为 6 771 × 10^4 人(表 1),人口年平均增长率为 0.48%,其中乌兹别克斯坦人口 3 075 × 10^4 人,是中亚人口最多的国家。中亚地区 GDP 总值为 3 447 × 10^8 美元,人均 GDP 为 5 090美元,约为同年世界人均 GDP(10 850 美元)的 1/2。灌溉农业在 GDP 中占重要地位[5],也是最大的用水部门。中亚地区耕地面积为 377 456 km^2,占总面积的 9.43%,农作物以棉花、水稻、小麦、玉米为主。

中亚五国总用水量约 1 246 × 10^8 m^3。从各国家来看,2014 年乌兹别克斯坦总用水量为 560 × 10^8 m^3,占中亚用水量的 44.94%,是第一用水大国。其次为土库曼斯坦,总用水量 279.5 × 10^8 m^3,占中亚

表 1 2014 年中亚五国社会经济概况

Tab. 1 Social and economic situation of the five Central Asian countries in 2014

国家	面积 / km^2	人口 / 10^4 人	人口增长率 / %	GDP / 10^8 美元	人均 GDP / 美元	耕地面积 / km^2	粮食产量 / $kg \cdot hm^{-2}$
KAZ	2 724 902	1 728.83	1.47	2 214.16	12 807.26	293 950	1 172.70
KGZ	199 949	583.55	2.01	74.68	1 279.77	12 806	2 276.30
TJK	141 376	836.27	2.24	92.36	1 104.46	7 300	3 189.70
TKM	488 100	546.62	1.85	435.24	7 962.37	19 400	1 198.00
UZB	447 400	3 075.77	1.69	630.67	2 050.45	44 000	4 823.60
中亚	4 001 727	6 771.05	0.48	3 447.11	5 090.96	377 456	1 635.13

注:KAZ,哈萨克斯坦;KGZ,吉尔吉斯斯坦;TJK,塔吉克斯坦;TKM,土库曼斯坦和 UZB,乌兹别克斯坦;数据来源于世界银行(世界发展指标)

表 2 2014 年中亚各国用水量

Tab. 2 Water consumption of Central Asian countries in 2014

国家	用水量 / 10^8 m^3				总用水量占比 / %
	农业	工业	市政生活	合计	
KAZ	140.00	62.60	8.80	211.40	16.97
KGZ	74.50	3.40	2.20	80.10	6.43
TJK	104.40	4.10	6.50	115.00	9.23
TKM	263.60	8.40	7.50	279.50	22.43
UZB	504.00	15.00	41.00	560.00	44.94
中亚	1 086.50	93.50	66.00	1 246.00	100.00

注:数据来源于联合国粮食及农业组织

用水量的 22.43%。塔吉克斯坦与吉尔吉斯斯坦用水量最少,分别为 115×10^8 m^3、80.1×10^8 m^3(表 2)。乌兹别克斯坦和土库曼斯坦两国均为农业大国,有较多灌溉农业用地,以种植棉花、水稻等高耗水作物为主,每年需大量水资源来满足灌溉要求。而且,由于灌溉技术落后,农业用水效率极其低,灌溉用水中约有 50% 在运输途中浪费[13]。从各用水部门来看,2014 年中亚地区农业部门用水量最多,高达 $1\,086.5\times10^8$ m^3,占总用水量的 87.20%,而工业、生活用水量占比分别为 7.50%、5.30%。各国内部情况同样如此,农业用水量占比远高于工业与生活用水。

2 水资源潜力的模糊综合评价

2.1 评价模型与指标体系选取

2.1.1 模糊综合评价模型 模糊综合评价法是基于模糊数学的隶属度理论,对受到多种因素制约的事物或对象做一个总体评价,即通过模糊数学把定性评价转化为定量评价[14-15]。

设给定两个有限论域 $U=[u_1,u_2,u_3\cdots,u_m]$;$V=\{v_1,v_2,v_3\cdots,v_n\}$,其中 U 表示综合评判的因素所组成的集合,V 表示评语所组成的集合,则模糊综合评判为 $B=A\times R=[b_1,b_2,\cdots b_n]$。式中 A 为集合 U 的模糊子集,B 为集合 V 上的模糊子集,并且可表示为:$A=(a_1,a_2\cdots,a_m)$,$0\leqq a_i\leqq1$;$B=\{b_1,b_2,b_3\cdots,b_n\}$,$0\leqq b_j\leqq1$。其中 a_i 表示单因素 u_i 在总体评判因素中所占的权重值,故满足 $\sum_{i=1}^{m}a_i=1$;b_j 表示综合评判的结果,$b_j=min\{1,\sum_{i=1}^{m}a_i\cdot r_{ij}\}$。评判矩阵 R 表示为:

$$R=\begin{matrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1n} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \\ r_{12} & r_{m2} & \cdots & r_{mn} \end{matrix} \quad (1)$$

式中:r_{ij}表示第 i 个因素 u_i 的评价对等级 v_j 的隶属度;R 中某一行 $R_i(r_{i1},r_{i2}\cdots,r_{in})$为评价因素 u_i 的单因素评判结果[15]。

2.1.2 评估指标分级、评分 根据 Logistic 模型,通常将水资源开发利用过程分为 3 个阶段:V_1 为初级阶段,水资源开发利用程度较小,开发潜力巨大;V_2 为中级阶段,水资源开发利用程度已达到一定规模,但仍具有较大开发潜力;V_3 为高级阶段,水资源开发利用程度已接近饱和,进一步开发的潜力较小[16]。根据水资源开发利用的 3 个阶段,将各评价指标分为 V_1,V_2,V_3 3 个等级,为了更客观地反映各级评价因素对开发潜力的影响,对 V_1,V_2,V_3 进行 0~1区间的评分,根据区域水资源开发潜力评判理论[15],令 $\beta_1=0.95$,$\beta_2=0.5$,$\beta_3=0.05$(β_1、β_2、β_3 表示各级因素对水资源开发潜力影响的参数),按公式(2)得到水资源开发潜力的综合评分值 T,评分越高,表示水资源开发潜力越大[17]。

$$T=\frac{\sum_{j=1}^{3}b_j\times\beta_j}{\sum_{j=1}^{3}b_j} \quad (2)$$

式中:b_j 表示综合评判结果。

2.1.3 计算评判矩阵 R R 中任意元素 r_{ij}表示某评判因素 u_i 对某等级 $V_j(j=1,2,3)$的隶属度,因此,需计算各评判因素分别对各等级 $V_j(j=1,2,3)$的隶属度值。各评判因素对水资源开发潜力评价存在正负效应,对于各负作用指标,其评价隶属函数计算公式为[16-18]:

$$\mu_{v1}(u_i)=\begin{cases} 0.5\left(1+\frac{k_1-u_i}{k_2-u_i}\right), & u_i<k_1 \\ 0.5\left(1-\frac{u_i-k_1}{k_2-k_1}\right), & k_1\leqslant u_i<k_2 \\ 0, & u_i\geqslant k_2 \end{cases} \quad (3)$$

$$\mu_{v2}(u_i)=\begin{cases}0.5\left(1-\dfrac{k_1-u_i}{k_2-u_i}\right), & u_i<k_1\\ 0.5\left(1+\dfrac{u_i-k_1}{k_2-k_1}\right), & k_1\leqslant u_i<k_2\\ 0.5\left(1+\dfrac{k_3-u_i}{k_3-k_2}\right), & k_2\leqslant u_i<k_3\\ 0.5\left(1-\dfrac{u_i-k_3}{u_i-k_2}\right), & k_3\leqslant u_i\end{cases}\tag{4}$$

$$\mu_{v3}(u_i)=\begin{cases}0.5\left(1+\dfrac{u_i-k_3}{u_i-k_2}\right), & k_3\leqslant u_i\\ 0.5\left(1-\dfrac{k_3-u_1}{k_3-k_2}\right), & k_2\leqslant u_i<k_3\\ 0, & k_2>u_i\end{cases}\tag{5}$$

正作用指标的评价隶属函数计算公式为:

$$\mu_{v1}(u_i)=\begin{cases}0.5\left(1+\dfrac{k_1-u_i}{k_2-u_i}\right), & u_i\geqslant k_1\\ 0.5\left(1-\dfrac{u_i-k_1}{k_2-k_1}\right), & k_2\leqslant u_i<k_1\\ 0, & u_i<k_2\end{cases}\tag{6}$$

$$\mu_{v2}(u_i)=\begin{cases}0.5\left(1-\dfrac{k_1-u_i}{k_2-u_i}\right), & u_i\geqslant k_1\\ 0.5\left(1+\dfrac{u_i-k_1}{k_2-k_1}\right), & k_2\leqslant u_i<k_1\\ 0.5\left(1+\dfrac{k_3-u_i}{k_3-k_2}\right), & k_3\leqslant u_i<k_2\\ 0.5\left(1-\dfrac{u_i-k_3}{u_i-k_2}\right), & u_i\leqslant k_3\end{cases}\tag{7}$$

$$\mu_{v3}(u_i)=\begin{cases}0.5\left(1+\dfrac{u_i-k_3}{u_i-k_2}\right), & u_i\leqslant k_3\\ 0.5\left(1-\dfrac{k_3-u_1}{k_3-k_2}\right), & k_3\leqslant u_i<k_2\\ 0, & u_i\geqslant k_2\end{cases}\tag{8}$$

式中:k_1 为等级 V_1 与等级 V_2 的临界值;k_3 为等级 V_2 与等级 V_3 的临界值;k_2 为 V_2 等级的区间中值,$k_2=\dfrac{(k_1+k_3)}{2}$ [16]。

2.1.4 选取评估指标 在全面了解区域水资源供需状况及水资源系统的基础上,综合考虑中亚地区水资源开发利用、社会经济、生态环境特点,参照水资源供需分析指标体系及水资源评估指标体系,结合数据的可获得性,采用1997—2014年统计均值数据,从不同角度选取了以下8个评估指标[15-16]:

(1)水资源利用率(U_1):区域用水量与可利用的水资源量之比(%)。

(2)灌溉率(U_2):区域灌溉面积与耕地总面积之比(%);

(3)地表水控制率(U_3):当地地表水蓄水工程入库水量与当地地表水资源量之比(%)。

(4)人均占有水量(U_4):区域水资源总量与总人口之比($m^3\cdot$人$^{-1}$)。

(5)重复利用率(U_5):重复用水量与区域总用水量之比(%)。

(6)生活用水定额(U_6):生活用水量与总人口之比(L·人$^{-1}$)。

(7)供水量模数(U_7):区域供水量与土地面积之比(10^4 $m^3\cdot km^{-2}$)。

(8)生态环境用水率(U_8):区域生态环境用水量与水资源总需求量之比(%)。

其中 U_1,U_2,U_3,U_5,U_6,U_7 为负作用指标,对水资源开发潜力值存在负效应;U_4,U_8 为正作用指标,对水资源开发潜力值存在正效应。中亚五国初始评估指标数据集见表3,各评估因素的指标分级及临界值见表4。

2.1.5 确定指标权重

本文利用层次分析法确定各指标的权重[15,17]。根据1~9标度法对各指标因素的相对重要性进行两两比较,构造重要性评判矩阵(表5),采用Matlab软件包计算各指标的权重分配,得到权重 $A=(0.36,0.04,0.20,0.04,0.20,0.04,0.04,0.08)$。最后对结果进行一致性检验,检验指标为 $CR=CI/RI$,其中 $CI=\dfrac{\lambda_{max}-n}{n-1}$,$\lambda_{max}$ 为评判矩阵的最大特征值,n 为评判矩阵阶数;RI 为平均随机一致性指标,取值可通过查表获得[19]。若 $CR<0.1$,则通过一致性检验。本研究中 $CR=CI/RI=0.0379/1.41=0.019<0.1$,所以评判矩阵具有满意的一致性,表明此结果可用。

表 3　中亚各国初始评估指标数据集

Tab. 3　Initial index value set of evaluation factors in Central Asian countries

国家	U_1 / %	U_2 / %	U_3 / %	U_4 / $m^3 \cdot$ 人$^{-1}$
KGZ	34.92	79.16	38.86	9 324.20
TJK	53.05	96.73	60.76	8 986.80
TKM	107.15	97.84	32.63	287.92
UZB	114.82	95.57	38.03	605.04
中亚	54.30	26.53	69.51	3 275.36
国家	U_5 / %	U_6 / L · 人$^{-1}$	U_7 / 10^4 $m^3 \cdot km^{-2}$	U_8 / %
KAZ	1.17	51.64	0.82	62.77
KGZ	3.36	52.06	4.27	43.53
TJK	2.52	102.00	8.23	34.06
TKM	1.49	206.25	1.43	21.12
UZB	12.21	174.30	13.03	17.89
中亚	4.15	83.38	5.55	34.84

表 4　评估因素指标分级

Tab. 4　Level index of each evaluation factor

评估因素	初级阶段 (V_1)	中级阶段 (V_2)	高级阶段 (V_3)
U_1/ %	<20	20 ~ 60	>60
U_2/ %	<15	15 ~ 50	>50
U_3/ %	<5	5 ~ 25	>25
U_4/ $m^3 \cdot$ 人$^{-1}$	>3 000	1 050 ~ 3 000	<1 050
U_5/ %	<50	50 ~ 80	>80
U_6/ L · 人$^{-1}$	<70	70 ~ 130	>130
U_7/ 10^4 $m^3 \cdot km^{-2}$	<10	10 ~ 15	>15
U_8/ %	>25	15 ~ 25	<15

表 5　重要性评判矩阵

Tab. 5　Structure of the importance judgment matrix

A	U_1	U_2	U_3	U_4
U_1	1.000	7.000	3.000	7.000
U_2	0.143	1.000	0.200	1.000
U_3	0.333	5.000	1.000	5.000
U_4	0.143	1.000	0.200	1.000
U_5	0.333	6.000	1.000	6.000
U_6	0.167	1.000	0.167	1.000
U_7	0.167	1.000	0.167	1.000
U_8	0.200	3.000	0.333	1.000
U_5	U_6	U_7	U_8	
U_1	3.000	6.000	6.000	5.000
U_2	0.167	1.000	1.000	0.333
U_3	1.000	6.000	6.000	3.000
U_4	0.167	1.000	1.000	1.000
U_5	1.000	5.000	5.000	3.000
U_6	0.200	1.000	1.000	0.333
U_7	0.200	1.000	1.000	0.333
U_8	0.333	3.000	3.000	1.000

2.2　水资源开发潜力综合评分值

根据隶属度计算公式得到中亚各国及整体评判矩阵 R：

$$R_{KAZ} = \begin{matrix} 0.48 & 0.52 & 0.00 \\ 0.66 & 0.34 & 0.00 \\ 0.00 & 0.64 & 0.36 \\ 0.76 & 0.24 & 0.00 \\ 0.88 & 0.12 & 0.00 \\ 0.39 & 0.31 & 0.00 \\ 0.89 & 0.11 & 0.00 \\ 0.94 & 0.06 & 0.00 \end{matrix} \qquad R_{KGZ} = \begin{matrix} 0.13 & 0.87 & 0.00 \\ 0.00 & 0.19 & 0.81 \\ 0.00 & 0.21 & 0.79 \\ 0.93 & 0.07 & 0.00 \\ 0.88 & 0.12 & 0.00 \\ 0.69 & 0.31 & 0.00 \\ 0.85 & 0.15 & 0.00 \\ 0.89 & 0.11 & 0.00 \end{matrix}$$

$$R_{TJK} = \begin{matrix} 0.00 & 0.67 & 0.33 \\ 0.00 & 0.14 & 0.86 \\ 0.00 & 0.11 & 0.89 \\ 0.93 & 0.07 & 0.00 \\ 0.88 & 0.12 & 0.00 \\ 0.00 & 0.97 & 0.03 \\ 0.71 & 0.29 & 0.00 \\ 0.82 & 0.18 & 0.00 \end{matrix} \qquad R_{TKM} = \begin{matrix} 0.00 & 0.15 & 0.85 \\ 0.00 & 0.13 & 0.87 \\ 0.00 & 0.28 & 0.72 \\ 0.00 & 0.28 & 0.72 \\ 0.88 & 0.12 & 0.00 \\ 0.00 & 0.14 & 0.86 \\ 0.89 & 0.11 & 0.00 \\ 0.11 & 0.89 & 0.00 \end{matrix}$$

$$R_{UZB} = \begin{matrix} 0.00 & 0.13 & 0.87 \\ 0.00 & 0.14 & 0.86 \\ 0.00 & 0.22 & 0.78 \\ 0.00 & 0.34 & 0.66 \\ 0.86 & 0.14 & 0.00 \\ 0.00 & 0.20 & 0.80 \\ 0.00 & 0.89 & 0.11 \\ 0.00 & 0.79 & 0.21 \end{matrix} \qquad R_{中亚} = \begin{matrix} 0.00 & 0.64 & 0.36 \\ 0.17 & 0.83 & 0.00 \\ 0.00 & 0.09 & 0.91 \\ 0.61 & 0.39 & 0.00 \\ 0.88 & 0.12 & 0.00 \\ 0.28 & 0.72 & 0.00 \\ 0.82 & 0.18 & 0.00 \\ 0.83 & 0.17 & 0.00 \end{matrix}$$

基于评价模型 $B = A \times R$，对中亚各国进行水资源开发利用阶段与潜力综合评判，并进行归一化处理，得到以下结果：

$$B_{KAZ} = (0.544\,0,\ 0.384\,0,\ 0.072\,0)$$

$$B_{KGZ} = (0.392\,8,\ 0.416\,8,\ 0.190\,4)$$

$$B_{TJK} = (0.307\,2,\ 0.360\,4,\ 0.332\,4)$$

$$B_{TKM} = (0.220\,4,\ 0.231\,6,\ 0.548\,0)$$

$$B_{UZB} = (0.172\,0,\ 0.244\,8,\ 0.583\,2)$$

$$B_{中亚} = (0.317\,6,\ 0.370\,8,\ 0.311\,6)$$

最后，根据公式(2)，分析得到中亚五国水资源开发潜力的综合评分值(表 6)：

表 6　中亚五国水资源开发阶段及潜力综合评估结果

Tab. 6　Results of comprehensive assessment of water resources development stages and potential in five Central Asian countries

地区	初级阶段(V_1)	中级阶段(V_2)	高级阶段(V_3)	综合评分值
KAZ	0.540 0	0.384 0	0.072 0	0.712 4
KGZ	0.392 8	0.416 8	0.190 4	0.591 1
TJK	0.307 2	0.360 4	0.332 4	0.488 7
TKM	0.220 4	0.231 6	0.548 0	0.352 6
UZB	0.172 0	0.244 8	0.583 2	0.315 0
中亚	0.317 6	0.370 8	0.311 6	0.502 7

从表 6 可以看出,根据最大隶属度原则,中亚水资源开发利用整体处于中级阶段 V_2,即水资源开发利用的发展阶段,该阶段水资源开发已具有一定规模,但综合评分值较高,为 0.502 7。与国际上其他干旱地区相比,中亚地区仍有很大的开发潜力。如中国西北干旱区,水资源总量相对缺乏,生态环境脆弱,水资源开发利用程度已达较高水平[20],部分地区水资源开发利用程度已接近水资源承载力饱和值:在甘肃河西走廊的石羊河流域,水资源开发潜力综合评分值仅为 0.232[21],疏勒河流域水资源开发潜力综合评分值为 0.383[16],该地区需注重农业节水,调整产业结构,以确保农业经济的可持续发展。同时,加大水利工程建设力度,促进经济向低耗水方向发展。非洲地区,人口众多而水资源十分短缺,水危机形势严峻。联合国报告指出,目前非洲已有 14 个国家严重缺水[22]。非洲地区农业用水量占总用水量的 86%,与中亚地区农业用水占比相当,但目前水资源开发利用程度较低,开发利用率仅为 4%,是中亚水资源开发利用率(54.30%)的 7.40%。同时水资源利用效率也较低,由于资金缺乏与管理不善等原因,水浪费与污染现象严重[23-24]。

从中亚各国家水资源开发潜力来看,哈萨克斯坦水资源开发利用程度最小,处于初级阶段 V_1,综合评分值最高,达 0.712 4,水资源开发潜力较大;吉尔吉斯斯坦、塔吉克斯坦两国水资源开发利用皆处于中级阶段 V_2,综合评分值分别为 0.591 1、0.488 7。但吉塔两国有水无地,且大部分水资源储存于冰川积雪中,开发难度较大,成为这两个国家农业发展的瓶颈;土库曼斯坦与乌兹别克斯坦两国的水资源开发利用处于高级阶段 V_3,综合评分值最低,分别为 0.352 6、0.315 0,水资源开发潜力已较小,须进一步加强水资源综合管理,注重技术创新,优化配置,实现水资源高效利用。以色列是世界上最为缺水地区,超过 95% 的水资源被开发利用,水资源开发利用程度已达到相当高的阶段[25-26]。但该国充分利用有限的水土资源,大力发展滴灌、喷灌等高效灌溉技术,实行严格的水管理制度,拥有发达的现代农业。以色列高效管理利用水资源的经验可供同处于水资源开发高级阶段的乌、土两国以及整个中亚地区借鉴。

3　结 论

本文通过采用模糊综合评价与层次分析相结合的方法,对中亚地区水资源开发潜力进行了评估,得到以下初步结论:

(1) 中亚地区水资源开发利用整体处于中级阶段,该阶段水资源开发规模仍保持上升趋势,水资源开发潜力的综合评分值较高,为 0.502 7,具有较大的开发潜力,开发方式应由广度逐渐向深度拓展。其中,哈萨克斯坦水资源综合评分值最高,为 0.712 4,开发潜力最大。该国灌溉率、水资源开发利用率、重复利用率指标在五国中是最低的,由于受气候变化及其他因素的影响,该国径流量近些年来有所下降,导致农业灌溉用水不足,灌溉率降低。并且由于设施老化和管理不善,水资源利用率也较低,今后应摒弃不合理的水资源利用方式,进一步加强水利基础设施建设,采用先进高效的节水技术,提高水资源利用效率。

(2) 中亚地区的上游国家吉尔吉斯斯坦和塔吉克斯坦的水资源开发利用均处于中级阶段,综合评分值较高,分别为 0.591 1、0.488 7,有较大的水资源开发潜力。并且因地理位置优势,两国拥有丰富的水资源和开发利用的优先权[27],但由于可开垦耕地较少而受到限制[1]。今后水资源应由广度开发逐渐向深度开发转变,经济类型由耗水型逐渐向节水型转变,发展水电能源,调解好与下游国家的水能交换关系,提高科技自主性,注重水资源综合管理。

(3) 土库曼斯坦和乌兹别克斯坦是中亚地区水资源开发利用程度最高的两个国家,均处于高级阶段,开发利用接近于饱和状态。综合评分值最低,分别为 0.352 6、0.315 0,水资源开发潜力相对较小。

两国皆是中亚地区的用水大国,但国家内部产水量极少,可利用的水资源主要通过引水系统由上游国家引入。两国今后应以水资源深度开发为主,发展节水型经济,尤其是节水农业,采用先进的灌溉技术与水利基础措施,提高水资源利用效率。加强水资源综合管理,在开发水资源的同时注重生态环境保护,加强与其他国家的交流合作,共同高效管理利用跨界河流水资源。

中亚水资源开发利用与合作管理是国内外研究的热点问题,已有研究主要分析了中亚各国的水资源量,社会经济发展与用水现状,以及水资源开发利用过程中存在的问题,并提出一系列跨界河流管理建议[28-32],而目前关于中亚水资源开发程度与潜力方面的研究成果较少,缺乏对区域水资源开发利用潜力的量化分析。本研究在分析水资源开发利用现状的基础上,预估了中亚五国的水资源开发潜力,得出中亚水资源开发利用整体处于中级阶段、具有较大开发潜力的结论,并针对各国水资源开发利用所处的不同阶段,提出未来如何合理开发管理水资源的建设性意见,为实现中亚水资源可持续利用提供有价值的参考。

参考文献(References)

[1] CHEN Y N,LI Z,FANG G H,et al. Large hydrological processes changes in the transboundary rivers of Central Asia[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2018, 123 (10): 5059 - 5069.

[2] HU Z Y,ZHANG C,HU Q,et al. Temperature changes in Central Asia from 1979 to 2011 based on multiple datasets[J]. Journal of Climate,2014,27(3):1143 - 1167.

[3] 陈亚宁,李稚,方功焕,等. 气候变化对中亚天山山区水资源影响研究[J]. 地理学报,2017,72(1):18 - 26. [CHEN Yaning,LI Zhi,FANG Gonghuan,et al. Impact of climate change on water resources in the Tianshan Mountains, Central Asia[J]. Acta Geographica Sinica,2017,72(1):18 - 26.]

[4] 邓铭江,龙爱华,章毅,等. 中亚五国水资源及其开发利用评价[J]. 地球科学进展,2010,25(12):1347 - 1356. [DENG Mingjiang,LONG Aihua,ZHANG Yi,et al. Assessment of water resources development and utilization in the five Central Asia countries[J]. Advances in Earth Science,2010,25(12):1347 - 1356.]

[5] 郝林钢,左其亭,刘建华,等. "一带一路"中亚区水资源利用与经济社会发展匹配度分析[J]. 水资源保护,2018,34(4):42 - 48. [HAO Lingang,ZUO Qiting,LIU Jianhua,et al. Analysis of matching degree between water resource utilization and economic-social development in Central Asia area of "Belt and Road"[J]. Water Resources Protection,2018,34(4):42 - 48.]

[6] 吉力力·阿不都外力,木巴热克·阿尤普,刘东伟,等. 中亚五国水土资源开发及其安全性对比分析[J]. 冰川冻土,2009,31(5):960 - 968. [ABUDUWAILI Jilili,AYOUPU Mubareke,LIU Dongwei,et al. Comparative analysis of the land water resources exploitation and its safety in the five countries of Central Asia[J]. Journal of Glaciology and Geocryology,2009,31(5):960 - 968.]

[7] CHEN Y N,LI W H,DENG H J,et al. Changes in Central Asia's water tower:Past,present and future[J]. Scientific Reports,2016,6(1):35458.

[8] DENG H J,CHEN Y N. Influences of recent climate change and human activities on water storage variations in Central Asia[J]. Journal of Hydrology,2017,544:46 - 57.

[9] SCHLUTER M J,KHASANKHANOVA G,TALSKIKH V,et al. Enhancing resilience to water flow uncertainty by integrating environmental flows into water management in the Amudarya River, Central Asia[J]. Global & Planetary Change,2013,110:114 - 129.

[10] 焦凡. 中亚水资源状况概述[J]. 科学技术,2011,9(4):103 - 104. [JIAO Fan. Overview of water resources in Central Asia[J]. Science and Technology,2011,9(4):103 - 104.]

[11] 陈曦,罗格平,吴世新,等. 中亚干旱区土地利用与土地覆被变化[M]. 北京:科学出版社,2015:21 - 38. [CHEN Xi,LUO Geping,WU Shixin,et al. Land use/cover change in arid land of Central Asia[M]. Beijing:Science Press,2015:21 - 38.]

[12] CROSA G,FROEBRICH J,NIKOLAYENKO V,et al. Spatial and seasonal variations in the water quality of the Amu Darya River (Central Asia)[J]. Water Research,2006,40(11):2237 - 2245.

[13] 付颖昕. 中亚的跨境河流与国家关系[D]. 兰州:兰州大学,2009. [FU Yingxin. Transboundary rivers and international relations in Central Asia[D]. Lanzhou:Lanzhou University,2009.]

[14] 苌垆. 实用模糊数学[M]. 北京:科学技术文献出版社,1989:179 - 227. [JIN Lu. Practical fuzzy mathematics[M]. Beijing:Science and Technology Literature Press,1989:179 - 227.]

[15] 贾嵘,沈冰,蒋晓辉,等. 区域水资源潜力综合评判[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版),1999,27(5):44 - 49. [JIA Rong,SHEN Bing,JIANG Xiaohui,et al. Regional water resource potentiality analyses and evaluation[J]. Journal of Northwest Agricultural University(Natural Science Edition),1999,27(5):44 - 49.]

[16] 赵春红,黄跃飞,韩京成,等. 疏勒河流域灌区水资源开发利用潜力研究[J]. 水文,2016,36(5):29 - 32. [ZHAO Chunhong, HUANG Yuefei, HAN Jingcheng, et al. Potential of development and utilization for water resources in irrigation areas of Shulehe River Basin[J]. Journal of China Hydrology,2016,36(5):29 - 32.]

[17] 张凯,韩永翔,张勃,等. 黑河中游水资源开发利用的阶段潜力研究[J]. 地理科学,2006,26(2):53 - 59. [ZHANG Kai,HAN Yongxiang,ZHANG Bo,et al. Stage potential of development and

utilization for water resources in the middle reaches of the Heihe River[J]. Scientia Geographica Sinica,2006,26(2):53 – 59.]

[18] 孟丽红,陈亚宁,李卫红. 新疆塔里木河流域水资源承载力评价研究[J]. 中国沙漠,2008,28(1):185 – 190. [MENG Lihong,CHEN Yaning,LI Weihong. Study of water resources carrying capacity in Tarim River Basin of Xinjiang[J]. Journal of Desert Research,2008,28(1):185 – 190.]

[19] 李俊晓,李朝奎,罗淑华,等. 基于 AHP-模糊综合评价方法的泉州市水资源可持续利用评价[J]. 水土保持通报,2015,35(1):210 – 214. [LI Junxiao,LI Zhaokui,LUO Shuhua,et al. Sustainable utilization evaluation of water resources in Quanzhou City based on AHP and fuzzy synthetic judgment[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation,2015,35(1):210 – 214.]

[20] 朱一中,夏军,王纲胜. 西北地区水资源承载力宏观多目标情景分析与评价[J]. 中山大学学报:自然科学版,2004,43(3):104 – 107. [ZHU Yizhong,XIA Jun,WANG Gangsheng. Assessment of water resources carrying capacity of northwest China[J]. Acta Scientlarum Naturalium Universitatis Sunyatseni,2004,43(3):104 – 107.]

[21] 苏永红,冯起,刘蔚,等. 应用模糊综合评判方法评价石羊河流域水资源承载力[J]. 干旱区研究,2009,26(2):169 – 175. [SU Yonghong,FENG Qi,LIU Wei,et al. Evaluation of the carrying capacity of water resources in the Shiyang River Basin using integrated fuzzy assessment[J]. Arid Zone Research,2009,26(2):169 – 175.]

[22] 马栋山,王圣瑞,李贵宝. 非洲水资源危机与乍得湖水问题[J]. 世界环境,2015,(2):42 – 44. [MA Dongshan,WANG Shengrui,LI Guibao. Africa water resources crisis and Lake Chad's problem[J]. World Environment,2015,(2):42 – 44.]

[23] 李淑芹,石金贵. 非洲水资源及利用现状[J]. 水利水电快报,2009,30(1):7 – 9. [LI Shuqin,SHI Jingui. Status of water resources and utilization in Africa[J]. Express Water Resources & Hydropower Information,2009,30(1):7 – 9.]

[24] 陈慧,冯利华,董建博. 非洲水资源承载力及其可持续利用[J]. 水资源与水工程学报,2010,21(2):49 – 52. [CHEN Hui,FENG Lihua,DONG Jianbo. Carrying capacity and sustainable utilization of water resources in Africa[J]. Journal of Water Resources & Water Engineering,2010,21(2):49 – 52.]

[25] 田长彦,周宏飞,宋郁东. 以色列的水资源管理、高效利用与农业发展[J]. 干旱区研究,2000,17(4):63 – 67. [TIAN Changyan,ZHOU Hongfei,SONG Yudong. Israel's water resources management,efficient use and agricultural development[J]. Arid Zone Research,2000,17(4):63 – 67.]

[26] SHAMIR U. Application of operations research in Israel's water sector[J]. European Journal of Operational Research,1980,5(5):332 – 345.

[27] 李湘权,邓铭江,龙爱华,等. 吉尔吉斯斯坦水资源及其开发利用[J]. 地球科学进展,2010,25(12):1367 – 1375. [LI Xiangquan,DENG Mingjiang,LONG Aihua,et al. Analysis of water resources development in Kyrgyzstan and water problems[J]. Advances in Earth Science,2010,25(12):1367 – 1375.]

[28] 邓铭江. 哈萨克斯坦跨界河流国际合作问题[J]. 干旱区地理,2012,35(3):365 – 376. [DENG Mingjiang. International cooperation problems on transboundary rivers in Kazakhstan[J]. Arid Land Geography,2012,35(3):365 – 376.]

[29] 吴淼,张小云,罗格平,等. 哈萨克斯坦水资源利用[J]. 干旱区地理,2010,33(2):196 – 202. [WU Miao,ZHANG Xiaoyun,LUO Geping,et al. Situation of water resources utilization in Kazakhstan[J]. Arid Land Geography,2010,33(2):196 – 202.]

[30] 吴淼,张小云,王丽贤,等. 吉尔吉斯斯坦水资源及其利用研究[J]. 干旱区研究,2011,28(3):455 – 462. [WU Miao,ZHANG Xiaoyun,WANG Lixian,et al. Study on water resources and its utilization in Kyrgyzstan[J]. Arid Zone Research,2011,28(3):455 – 462.]

[31] 姚俊强,刘志辉,张文娜,等. 土库曼斯坦水资源现状及利用问题[J]. 中国沙漠,2014,34(3):885 – 892. [YAO Junqiang,LIU Zhihui,ZHANG Wenna,et al. Water resources and utilization in Turkmenistan[J]. Journal of Desert Research,2014,34(3):885 – 892.]

[32] 姚海娇,周宏飞. 中亚五国咸海流域水资源策略的博弈分析[J]. 干旱区地理,2013,36(4):764 – 771. [YAO Haijiao,ZHOU Hongfei. Games analysis of water resources strategy among the Central Asia countries around the Aral Sea Basin[J]. Arid Land Geography,2013,36(4):764 – 771.]

Assessment of the development potential of water resources in Central Asia based on fuzzy comprehensive evaluation model

WANG Xuan-xuan[1,2], CHEN Ya-ning[1], LI Zhi[1], FANG Gong-huan[1], WANG Fei[1,2], ZHANG Jiao-you[1,2]

(1 *State Key Laboratory of Desert and Oasis Ecology, Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi* 830011, *Xinjiang, China*; 2 *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100049, *China*)

Abstract: Central Asia is located in the center of Eurasia, with a large number of transboundary rivers, and the conflicts in using water resources are aggravating under the dual influence of climate change and human activities. The problem of water resources and ecological environment in this region has always been a hot topic in the academic research. The quantitative assessment of the development and utilization potential of water resources in the region is of great significance for understanding the current status of water resources and improving the utilization rate of water resources. Based on the statistics of water resources from 1997 to 2014, we selected eight indicators, including utilization rate of water resource, irrigation ratio of arable land, control rate of surface water, per capita water supply, recycling rate of water resource, live use water quota, water supply module, and ecological water use ratio to establish an evaluation index system for the water resources, then quantitatively analyzed the development potential of water resources for five countries in Central Asia by using fuzzy comprehensive evaluation model. The results show that the development and utilization of water resources in Central Asia is in the intermediate stage, and the evaluated value is comparatively great (0.502 7), which indicates a great exploitation potential of water resources. Among these five countries, Kazakhstan has the highest evaluated value (0.712 4), which indicates the greatest exploitation potential of water resources, but unreasonable use of water should be abandoned. The evaluated values of Kyrgyzstan and Tajikistan are 0.591 1 and 0.488 7 respectively, which indicates a large exploitation potential of water resources, but these two countries should be transformed from breadth development to deep development gradually. The development and utilization of water resources in Turkmenistan and Uzbekistan are all in the advanced stage, and the evaluated values are 0.352 6 and 0.315 0 respectively, which indicates a least exploitation potential of water resources. In the future, these two countries should develop water-saving economy, and pay attention to the integrated management of water resources. All these conclusions provide scientific basis and decision support for the sustainable utilization of water resources in Central Asia.

Key words: development potential of water resources; fuzzy comprehensive evaluation model; the five Central Asian countries